بررسی تحلیلی رفتار لرزه‌ای تأثیر انواع چیدمان ورق‌های پیوستگی اتصال گیردار تیر به ستون‌های فلزی پرشده با بتن*

(یادداشت پژوهشی)

امید رضایی‌فر[۱] سید حسن یوسفی[۲] عادل یونسی[۳] مجید قلهکی[٤]

چکیده *استفاده از ورق‌های پیوستگی در تراز بال‌های کششی و فشاری تیر در داخل ستون جهت تأمین معیارهای سختی و مقاومت طبق ضوابط آئین‌نامهٔ ۲۸۰۰ و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان می‌باشد. ازآنجاکه در ستون‌های قوطی به‌علت بسته‌بودن مقطع، عدم دید کافی و زاویهٔ دید نامناسب، اجرای ورق‌های پیوستگی در داخل ستون مشکلات زیادی را به‌همراه دارد، ورق‌های پیوستگی از داخل ستون قوطی‌شکل حذف گردیده‌اند و صلبیت اتصال توسط سخت‌کننده‌هایی که از بیرون به اتصال جوش می‌شوند و اجرای آنها به‌همراتب ساده‌تر از ورق‌های پیوستگی است، تأمین می‌شود. برای این منظور مدل‌های اتصال فاقد ورق پیوستگی، اتصال با ورق پیوستگی، اتصال با سخت‌کننده‌های خارجی ذوزنقه‌ای‌شکل، اتصال با سخت‌کننده‌های داخلی شامل شبکه‌های آرماتور افقی و اتصال جدید پیشنهادی که شامل سخت‌کننده‌های خارجی، بتن و شبکه‌های آرماتور افقی می‌باشد توسط نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی و آنالیز شده است. نمودار بار-تغییرمکان مدل‌ها براساس تحلیل‌های مونوتونیک و سیکلیک رسم شده و از روی آنها صلبیت (درصدگیرداری)، مقاومت (ظرفیت‌نهایی)، شکل‌پذیری، میزان جذب انرژی و همچنین محل تشکیل مفاصل پلاستیک در هر اتصال تعیین گردیده است. از نتایج آنالیزها مشخص است که اتصال جدید پیشنهادی با کسب گیرداری ۱۸/ ۹٦ درصد، شکل‌پذیری ۷/۰٤، مقاومت نهایی ۸۹/٤۵ تن و انتقال مفصل پلاستیک به ناحیه‌ای دور از اتصال، معیارهای اتصالات صلب را به‌خوبی برآورده کرده و جایگزین مناسبی برای ورق‌های پیوستگی می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی ستون قوطی‌شکل پرشده با بتن، اتصال صلب، ورق پیوستگی، سخت‌کنندهٔ خارجی، چشمهٔ اتصال.

Analytical Study of Seismic Behavior Types of the Arrangement Effect on the Continuity Plates in Rigid Connection Between beam to Concrete Filled Steel Tube (CFST) Columns

O.Rezaifar S.H.Yousefi A.Yoonesi M.Gholhaki

Abstract *Using continuity plates in the balance of the tensile and compressive beam's flanges in the box column is for satisfying stiffness and strength criteria according to terms of the 2800 code and the tenth issue of national building regulations. Since in box columns due to section closure, lack of vision and inappropriate viewing angles performance of the continuity plates inside the column has many problems, continuity plates removed from the box column and rigidity of connection provide by stiffeners from outside welded the joint and their Installation is more simple than continuity plates. For this purpose connectivity models without continuity plates, connection with continuity plates, connection with trapezoidal external stiffener, connection with internal stiffener including networks of horizontal bar and the proposed new connection which includes of the external stiffeners, concrete and networks of horizontal bar by ANSYS software modeling and analyzed. Graph of force – displacement of models is drawn based on monotonic and cyclic analyzes and on their have been determined rigidity, strength, ductility, energy dissipation as well as the location of plastic hinges in every connection. The analysis determined that the proposed new connection with the acquisition of rigidity 96.18, ductility 7.04, ultimate strength 89.45 ton and transferred the plastic hinge into the area far from connection, therefor it is a good alternative for continuity plates.*

Key words Ox Column Filled With concrete, Rigid Connection, Continuity Plate, External Stiffener, Panel Zone.

---

* تاریخ دریافت مقاله۹۳/۵/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۹٤/۱۱/۵ می‌باشد .

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

Email : Orezayfar@semnan.ac.ir

(۲)کارشناسی ارشد سازه، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

(۳)دانشجوی دکتری سازه، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

(٤) دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

مقدمه

برای طراحی یک سازهٔ فولادی که از مجموعه‌ای از تیرها و ستون‌های متصل به‌هم در محل اتصال تشکیل شده، باید علاوه‌بر طراحی درست تیرها و ستون‌ها طوری عمل کرد که سیستم به‌صورت یکپارچه عمل کند. برای یکپارچه عمل‌کردن سیستم استفاده از اتصالات مناسب ضروری به‌نظر می‌رسد. کارامد بودن یک اتصال را فاکتورهای مختلفی تعیین می‌کنند که سختی و مقاومت دو فاکتور مهم می‌باشند. در سازه‌های فولادی زمانی که تعداد طبقات زیاد و یا دهانه‌ها بزرگ‌تر می‌شوند، لازم است که از ستون‌هایی با ممان اینرسی بالا استفاده شود. در ایران مقاطع نوردشدهٔ استاندارد عملا پاسخگوی این نیاز نیستند و لذا استفاده از مقاطع ساخته‌شده از ورق ضروری به‌نظر می‌رسد. ستون‌های قوطی به لحاظ این‌که در دو جهت دارای ممان اینرسی بالایی می‌باشند برای تحمل خمش مناسب به‌نظر می‌رسند؛ لیکن ستون‌های قوطی دارای مشکلاتی در زمینهٔ اجرا می‌باشند. یکی از این مشکلات، تأمین صلبیت اتصالات تیر به این‌گونه ستون‌هاست که باید توسط سخت‌کننده‌ها تأمین شود. صلبیت یک اتصال تحت تأثیر صلبیت تکیه‌گاه‌های آن قرار دارد. در یک اتصال صلب تیر به ستون قوطی، درصورت نازک بودن بال ستون در غیاب سخت‌کننده در اثر انتقال نیروی کششی از بال تیر به بال ستون، تغییرشکل غیریکنواختی به‌وجود می‌آید که این تغییرشکل‌ها باعث می‌شود توزیع تنش در طول جوش از حالت یکنواخت خارج می‌شود و تمرکز تنش بالایی به‌وجود آید. سخت-کننده این توزیع تنش را به حالت یکنواخت نزدیک می‌کند و صلبیت اتصال را تأمین می‌کند.

شانموگام و همکاران [1-7]، مطالعات مدون و منسجمی در این زمینه انجام داده‌اند. در مطالعات این تیم تحقیقاتی، سخت‌کننده‌های خارجی نبشی، ورق مثلثی، سخت‌کنندهٔ Tشکل و همچنین ورق پیوستگی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. هدف از انجام این مطالعات، پیدا کردن سخت‌کنندهٔ خارجی مناسب به‌عنوان جایگزین ورق پیوستگی داخلی بوده است، که بتواند فاکتورهای اساسی یک اتصال صلب و کارآمد را برآورده کند. از مطالعات این تیم تحقیقاتی نتیجه شده است که اتصال با سخت‌کنندهٔ Tشکل بهترین عملکرد را در بین سایر اتصالات به‌خود اختصاص داده است و جایگزین بسیار مناسبی برای اتصال با ورق پیوستگی داخلی می‌باشد. مالک و حاجی‌فتحعلی [۸] برروی عملکرد اتصال تیر I شکل به ستون قوطی در حالت‌های مختلف در حضور و عدم حضور ورق‌های پیوستگی با و بدون بتن پرکننده و همچنین استفاده از ورق‌های مثلثی پیرامونی با و بدون جوش این ورق‌ها به گوشهٔ ستون‌ها در انواع مختلفی از سخت‌کننده‌ها مطالعاتی انجام داده‌اند. در حیطهٔ مطالعات انجام‌شده توسط آنها نتایجی به شرح زیر حاصل شده است:

در اتصال با ورق‌های مثلثی پیرامونی سختی و شاخص گیرداری قابل ملاحظه‌ای (۹۱ درصد) ارائه گردیده است و درصورت استفاده از بتن داخل ستون در چنین اتصالی، شاخص گیرداری اتصال به میزان اندکی افزایش می‌یابد و به میزان ۹۳/٤ درصد می‌رسد. ویژگی‌های هندسی اتصال دارای ورق مثلثی پیرامونی منجر به ایجاد قابلیت تشکیل مفصل پلاستیک در تیر و موقعیت انتهای ورق‌های اتصال به فاصلهٔ مکفی و کنترل‌شده از بر ستون شده است و همچنین اتصال تضعیف‌شدهٔ استخوانی در تیر منجر به دورتر شدن موقعیت مفصل پلاستیک تیر از بر ستون می‌شود که ایدهٔ تیر ضعیف ستون قوی را تأمین می‌کند. زاهدی و سفیدگران [۹] به بررسی استفاده از سخت‌کننده‌های بیرونی به‌عنوان جایگزینی برای ورق‌های پیوستگی داخلی در اتصالات صلب تیر I به ستون قوطی پرداخته-اند. برای مطالعه، اتصالات با انواع مختلف سخت‌کننده از جمله ورق‌های پیوستگی داخلی، سخت‌کننده‌های مثلثی، سخت‌کننده‌های نبشی و سخت‌کنندهٔ T مورد آنالیز قرار گرفته‌اند. نتایج آنالیزها نشان می‌دهد به‌جز ورق

پیوستگی که اجرای آن در داخل ستون با مشکلاتی همراه است. سخت‌کنندۀ Tشکل در هر دو مشخصۀ سختی و مقاومت اتصال، عملکرد بهتری نسبت به سایر سخت‌کننده‌ها داشته است. از دیگر مطالعات انجام‌گرفته برروی اتصال تیرهای Iشکل به ستون قوطی برای مناطق لرزه‌خیز می‌توان به مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام شده توسط گوسوامی و مورتی [10] اشاره نمود. در این مطالعات برای تقویت اتصال از ورق‌های لچکی مورب برروی بال‌های فوقانی و تحتانی تیر استفاده شده است و رفتار اتصال پیشنهادی با اتصالات معمول مقایسه گردیده است. علاوه‌بر این مطالعات وسیع عددی و آزمایشگاهی برروی اتصال تیرهای قوی بااستفاده از ناودانی‌های متصل برروی بال‌های فوقانی و تحتانی تیر توسط کامر و رائو [11و12] انجام گرفته است.

اهمیت انجام تحقیق

در تحقیق حاضر به بررسی و ارائۀ اتصال جدید در سازه‌های فولادی با شکل‌پذیری ویژه و مقایسه بین حالتی که تیر I و ستون قوطی‌شکل پرشده با بتن بدون هیچ‌گونه ورق پیوستگی، با ورق پیوستگی داخلی، با سخت‌کننده‌های خارجی ذوزنقه‌ای‌شکل در تراز بال‌های فوقانی و تحتانی تیرهای اطراف ستون و حالاتی که از شبکه‌های آرماتور افقی به‌عنوان سخت‌کنندۀ داخلی استفاده شده، پرداخته شده است. برای مدل کردن اتصال و استخراج منحنی بار-تغییرمکان از نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است. برای نزدیک‌بودن رفتار مدل به واقعیت، از تحلیل غیرخطی استفاده شده و برای فولاد از منحنی تنش-کرنش دوخطۀ الاستوپلاستیک استفاده شده است. ازآنجایی‌که در ستون‌های CFST، فولاد اثر محصورکنندگی روی بتن دارد، در فرایند مدل‌سازی لحاظ شده است. روند انجام این تحقیق و آنالیز مدل‌ها بدین ترتیب بوده است که ابتدا یک اتصال با ورق‌های پیوستگی داخلی به‌عنوان سخت‌کننده توسط نرم‌افزار ANSYS مدل و تحلیل شده است و نمودار بار-تغییرمکان این مدل رسم شده است. درادامه، این ورق‌ها از داخل ستون حذف می‌شوند و سخت‌کننده‌های خارجی ذوزنقه‌ای‌شکل که از بیرون در تراز بال‌های تیر به ستون متصل می‌شوند و همچنین شبکه‌های آرماتور افقی که در داخل ستون در نواحی چشمۀ اتصال قرار می‌گیرند، جایگزین می‌شوند و همچنین اتصال جدید پیشنهادی که شامل سخت‌کننده‌های خارجی ذوزنقه‌ای‌شکل به‌همراه شبکه‌های آرماتور افقی و بتن پر-کنندۀ داخل ستون می‌باشد مدل‌سازی و آنالیز شده است. پس از آنالیز اتصالات، نمودار بار-تغییرمکان هر اتصال رسم شده و از روی آن سختی و مقاومت هر اتصال تعیین گردیده و مشخص شده است که کدام یک از اتصالات می‌توانند فاکتورهای لازم برای یک اتصال صلب را تأمین کنند و جایگزین مناسبی برای ورق‌های پیوستگی داخلی شوند.

معرفی مدل‌ها

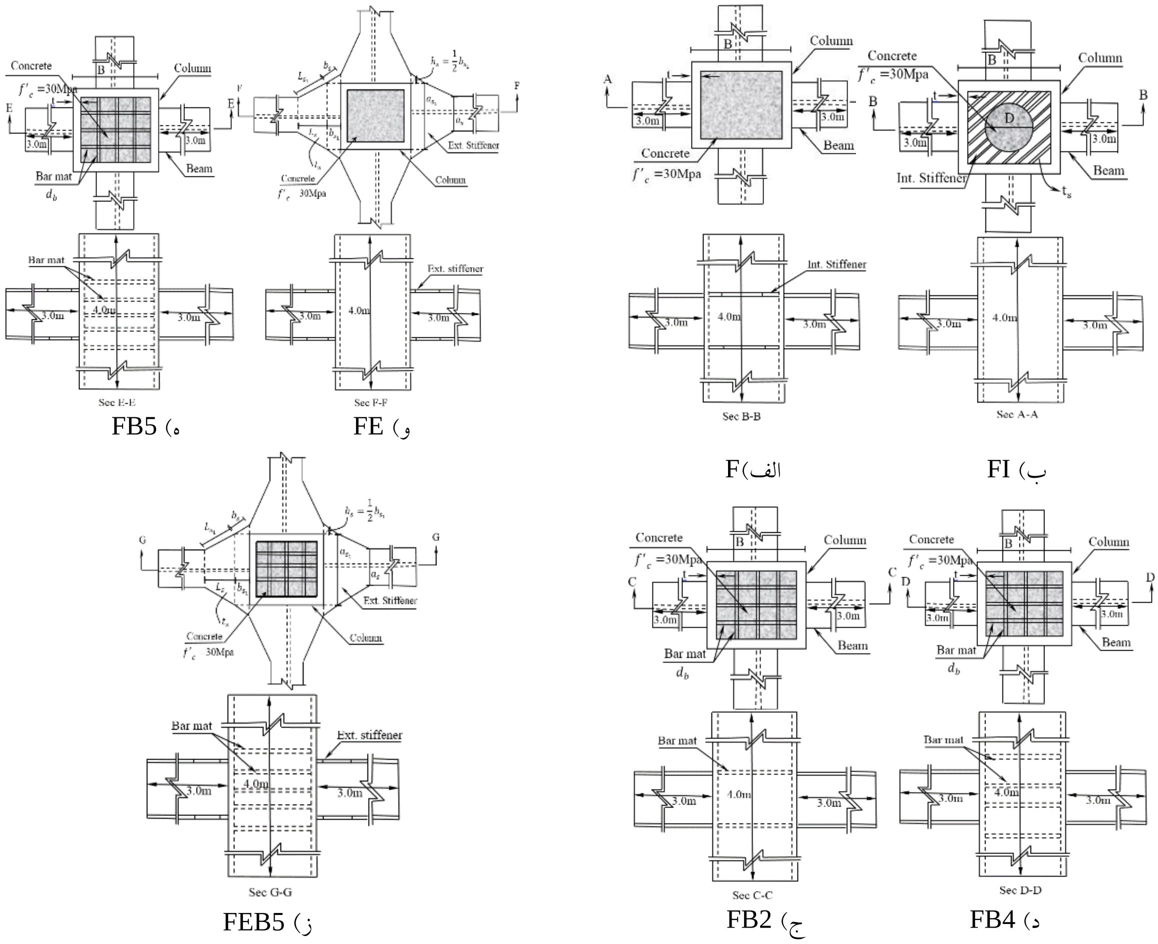
در این مقاله به‌منظور بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال تیر به ستون قوطی‌شکل پرشده با بتن ۷ مدل ارائه و بررسی شده است. مقطع تمامی تیرهای اتصالی به‌صورت I شکل و با مقطعی مطابق شکل (۱) می‌باشد. چشمۀ اتصال بااستفاده از انواع سخت‌کنندۀ خارجی و داخلی تقویت شده است که جزئیات این اتصالات در جدول (۱) و شکل (۱) ارائه شده است.

تحلیل عددی و تطبیق آزمایشگاهی

مشخصات مصالح و مدل. در مدل‌های موردنظر مصالح موجود فولاد و بتن می‌باشد. فولاد دارای منحنی تنش- کرنش الاستوپلاستیک است. باتوجه به این‌که تحلیل غیرخطی مصالح مورد نظر می‌باشد، مدل‌سازی رفتار بعد از تسلیم نیز لازم است. در برنامۀ ANSYS برای مدل‌کردن رفتار فولاد از انواع منحنی‌های الاستوپلاستیک می‌توان استفاده کرد. در این تحقیق برای مدل کردن رفتار فولاد از منحنی دوخطۀ الاستوپلاستیک نشان داده‌شده در شکل (۱) استفاده شده است. فولاد انتخاب‌شده از نوع معمول فولاد مورد استفاده در ایران یعنی ST37 می‌باشد.

جدول۱ جزئیات مدل‌ها (واحدها برحسب Cm)

مدل		F	FI	FB2	FB4	FB5	FE	FEB5
ستون H=400	Bxt	450x25	450x25	450x 25	450x 25	450x25	450x25	450x 25
تیر L=645	$b_f x t_f$	200x15	200x15	200x15	200x 15	200x15	200x 15	200x 15
	$h x t_w$	400x8	400x8	400x8	400x8	400x8	400x8	400x8
	d	430	430	430	430	430	430	430
شبکه آرماتور		-	-	*	*	*	-	*
	d_b	-	-	25	25	25	-	25
سختکننده داخلی		-	*	-	-	-	-	-
	ts	-	15	-	-	-	-	-
	axb	-	400x 400	-	-	-	-	-
	D	-	210	-	-	-	-	-
سختکننده حارجی		-	-	-	-	-	*	*
	t_s	-	-	-	-	-	15	15
	b_s	-	-	-	-	-	212	212
	b_{s1}	-	-	-	-	-	150	150
	l_s	-	-	-	-	-	500	500
	l_{s1}	-	-	-	-	-	515.4	515.4
	a_s	-	-	-	-	-	200	200
	a_{s1}	-	-	-	-	-	450	450

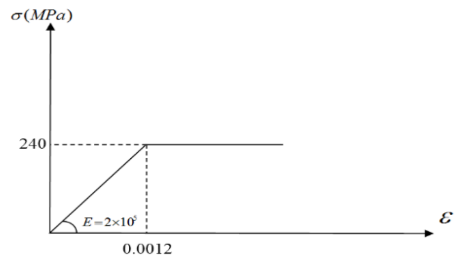


شکل۱ جزئیات مدل‌ها

جدول۲ مشخصات مصالح مصرفی

مصالح	F_y(MPa)	F_u(MPa)	F'_c (MPa)	E (MPa)	υ	$\gamma(kN/m^3)$
فولاد	240	370	-	2×10^5	0.3	78.55
بتن	-	-	30	0.27×10^5	0.2	24.00

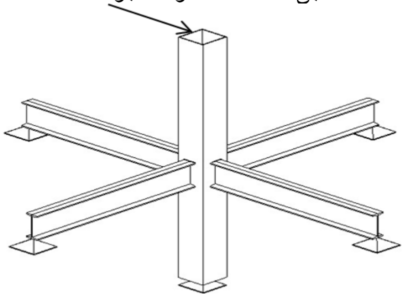
برای مصالح بتنی باتوجه به این‌که بتن داخل ستون در عمل به بتن محصورشده تبدیل می‌شود، در اینجا تلاش شده است که این موضوع در انتخاب ضوابط و منحنی رفتاری تنش- کرنش بتن نیز لحاظ گردد و همچنین باتوجه به این‌که مصالح به‌کار گرفته‌شده فولاد می‌باشد، معیار تسلیم، فون‌مایسز انتخاب شده است. قانون سخت‌شوندگی نیز ایزوتروپیک انتخاب شده است.



شکل۲ منحنی الاستوپلاستیک فولاد

برای مدل کردن فولاد از المان‌های مختلفی ازجمله SHELL, SOLID می‌توان استفاده کرد. در این تحقیق از المان پوسته‌ای سه‌بعدی چهارگرهی SHELL181 استفاده شده است. این المان اثرات هر دو تغییرشکل خمشی و غشایی را به‌خوبی در نظر می‌گیرد. المان دارای ٦ درجه آزادی در هر گره می‌باشد که شامل ۳ درجه آزادی انتقالی U_x، U_y و U_z در امتداد سه محور مختصات و ۳ درجه آزادی دورانی ROT_x, ROT_y, ROT_z حول سه محور مختصات می‌باشد. این المان قابلیت مدل‌سازی اجزای با ضخامت متغیر را نیز دارا می‌باشد. ضخامت‌ها در گره‌های المان تعریف می‌شوند و بین هر دو گره ضخامت به‌صورت خطی تغییر می‌کند.

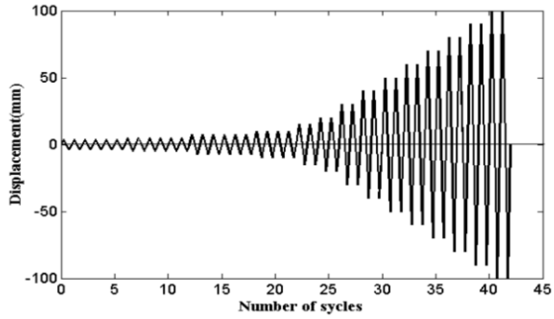
شرایط مرزی. مدل به‌کار رفته به این صورت است که چهار تیر هر کدام به طول ۳ متر از چهار طرف به یک ستون قوطی به طول ٤ متر متصل می‌شوند. انتهای هر کدام از تیرها و پای ستون روی تکیه‌گاه مفصلی قرار دارد. برای جلوگیری از تمرکز تنش در انتهای هر کدام از تیرها و پای ستون تمامی گره‌ها به‌هم کوپل می‌شوند تا یکپارچه عمل کنند. شرایط مرزی در این تحقیق به‌گونه‌ای است که تمامی درجات آزادی انتقالی در انتهای تیرها و پای ستون مقید شده‌اند و اعمال بار به‌صورت اعمال نیرو و تغییرمکان افقی در بالای ستون می‌باشد. با تعریف کردن Sub step برای بارگذاری، تغییرمکان‌ها به‌صورت تدریجی به سازه اعمال می‌شود و نتایج نیز در هر Sub step قابل مشاهده خواهد بود.



شکل۳ شمای کلی اتصال و نحوهٔ اعمال بار به آن

بارگذاری مدل‌ها. تحلیل‌های انجام‌شده در این تحقیق بر سه نوع استوار است که عبارتند از: ۱) آنالیز استاتیکی تک‌آهنگ که به‌صورت افزایشی است، ۲) آنالیز هیسترزیس که به‌صورت رفت‌وبرگشتی است و ۳) آنالیز مودال. اساس تحلیل تک‌آهنگ به‌صورت کنترل بار است و اساس تحلیل هیسترزیس به‌صورت کنترل تغییرمکان می‌باشد.

نمودار تاریخچه‌زمانی بارگذاری در این تحقیق براساس الگوی بارگذاری SAC97 [۱۳] می‌باشد که در شکل (٤) نشان داده شده است.



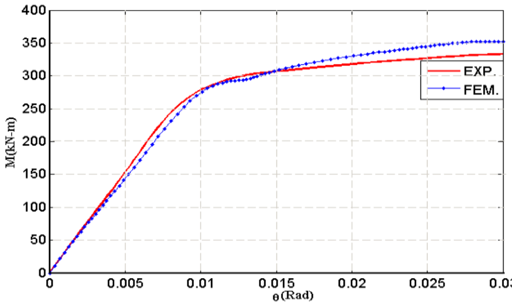
شکل٤ نمودار تاریخچه‌زمانی بارگذاری SAC97 [۱۳]

صحت‌سنجی تحلیلی مدل

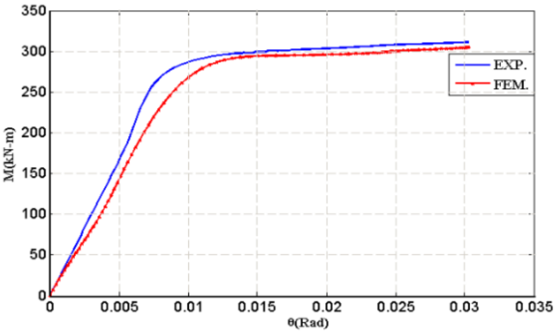
علی‌رغم این‌که مطالعات آزمایشگاهی دارای دقت و اعتبار بالایی می‌باشند ولی باتوجه به این‌که هزینه‌بر و زمانبر هستند و نیاز به امکانات و تجهیزات خاص دارند کمتر مورد توجه محققان قرار می‌گیرند. برهمین اساس استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود برای مطالعه مورد توجه قرار گرفته‌اند. باتوجه به این‌که هدف از مدل‌سازی در نرم‌افزار به‌دست آوردن رفتار واقعی سازه با تقریب قابل قبول می‌باشد، عوامل مختلفی مانند نوع المان، اندازهٔ مش، شرایط تکیه‌گاهی، نوع رفتار مصالح و... روی رفتار نهایی مدل تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین انتخاب صحیح موارد ذکرشده سبب افزایش دقت حل می‌شود. به‌منظور بررسی و تأیید صحت کار مدل‌سازی با نرم‌افزار ANSYS، باید نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی معتبر سنجیده شود.

در این تحقیق برای تأیید مدل‌سازی از دو نمونهٔ آزمایشگاهی ارائه‌شده توسط شانموگام و همکاران [1,4] استفاده شده است. نمونه با سخت‌کنندهٔ خارجی T و با ورق پیوستگی داخلی توسط نرم‌افزار ANSYS مدل و آنالیز شده و نتایج حاصل به‌صورت منحنی ممان- دوران ارائه شده است. نتایج اجزای محدود مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی موجود در مقالهٔ شانموگام و همکاران مقایسه شده است. تطابق خوب نتایج، صحت کار مدل-سازی را تأیید می‌کند.

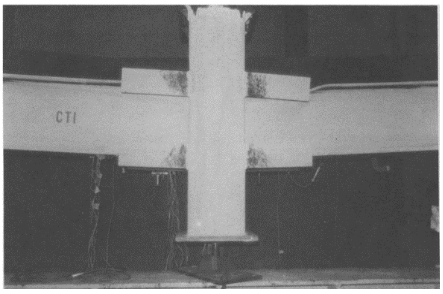
مقایسهٔ منحنی‌های ممان- دوران آزمایشگاهی و تحلیلی این دو نمونه در اشکال (٥ و ٦) ارائه شده است.



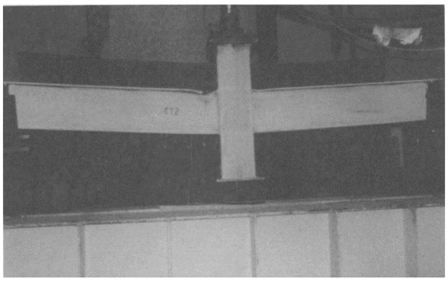
شکل٥ منحنی ممان- دوران نمونه با سخت‌کنندهٔ خارجی T



شکل٦ منحنی ممان- دوران نمونه با ورق پیوستگی



الف)



ب)

شکل٧ انجام آزمایش، الف)سخت‌کنندهٔ T، ب) ورق پیوستگی[4]

بررسی نتایج تحلیل

در این بخش پس از انجام آنالیزهای استاتیکی تک‌آهنگ، رفت و برگشتی، آنالیز مودال و حصول نتایج این آنالیزها،

به مقایسه، بررسی و بحث در نتایج استخراج‌شده پرداخته شده است. پارامترهایی که در این بخش مورد مقایسه قرار گرفته‌اند عبارتند از ظرفیت نهایی، شکل‌پذیری، سختی اولیه، محل تشکیل مفصل پلاستیک، تنش حداکثر، میزان جذب انرژی و فرکانس‌های سازه. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که اتصال با سخت‌کننده‌های خارجی ذوزنقه‌ای‌شکل بهترین رفتار را درمقایسه با سایر اتصالات دارد و جایگزین بسیار مناسبی است برای اتصال با ورق پیوستگی که مدنظر آئین‌نامه می‌باشد.

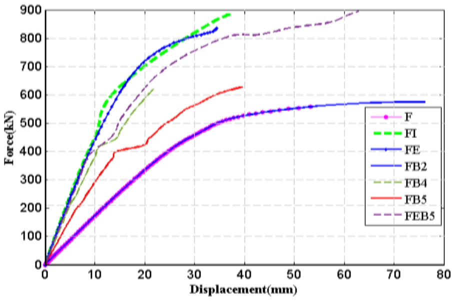
بررسی نتایج آنالیز مودال اتصالات. در جدول (۳) مقادیر فرکانس و تغییرمکان افقی سه مود اول هر اتصال تحت آنالیز مودال ارائه شده است. این آنالیز برای بررسی رفتار فرکانسی اتصالات انجام گرفته است.

جدول۳ نتایج آنالیز مودال اتصالات

نام مدل	شماره مود	فرکانس (Hz)	تغییر مکان افقی (mm)
F	۱	۱۶/۹۱۵	۱۵/۶
	۲	۱۶/۹۱۷	۱۵/۷
	۳	۲۲/۳۶۹	۲۱/۵
FI	۱	۱۷/۲۵۷	۱۵/۶
	۲	۱۷/۲۷۳	۱۵/۷
	۳	۲۲/۸۶۸	۲۱/۰۱
FE	۱	۱۶/۱۸۲	۱۵/۳۵
	۲	۱۶/۲۱۴	۱۵/۳۳
	۳	۲۳/۱۶۷	۲۰/۴۹
FB2	۱	۱۶/۴۳۵	۱۵/۵۸
	۲	۱۶/۷۶۴	۱۵/۵۱
	۳	۲۲/۹۷۸	۲۰/۶۶
FB4	۱	۱۷/۰۲۹	۱۵/۶۹
	۲	۱۷/۰۵۲	۱۵/۶۸
	۳	۲۲/۷۴۷	۲۰/۹۶
FB5	۱	۱۳/۳۰۷	۱۴/۴۶
	۲	۱۳/۴۱۲	۱۴/۴۸
	۳	۲۱,۵۲۸	۲۰/۴۷
FEB5	۱	۱۶/۱۷۵	۱۵/۳۳
	۲	۱۶/۲۰۷	۱۵/۳۲
	۳	۲۳/۱۵۷	۲۰/۴۷

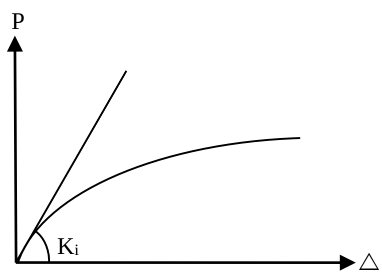
ازآنجاکه سه مود اول حاکم است و مودهای بعدی از اهمیت چندانی برخوردار نمی‌باشند نتایج این سه مود در جدول (۳) ارائه شده است. برای هر اتصال مود سوم دارای بیشترین فرکانس می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در مودهای بالاتر فرکانس‌ها افزایش می‌یابد و مدل‌های با سختی بالاتر فرکانس‌های بیشتری دارند.

بررسی نتایج تحلیل و مدل‌سازی تحت تأثیر بارگذاری تک‌آهنگ. به‌کمک منحنی بار- تغییرمکان اتصالات پارامترهای درصد گیرداری، ضریب شکل‌پذیری و مقاومت نهایی قابل محاسبه است. در شکل (۸) منحنی بار- تغییرمکان مدل‌های مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل۸ منحنی بار- تغییرمکان اتصالات مورد مطالعه

مقایسهٔ اتصالات از دیدگاه درصد گیردای. برای محاسبهٔ درصد گیرداری، مطابق رابطهٔ (۱) سختی (شیب منحنی) اتصال شکل (۹) بر سختی خمشی تئوریک اعضای متصل به اتصال تقسیم می‌شود که مقدار به‌دست‌آمده همان درصد گیرداری اتصال می‌باشد.



شکل ۹ نحوهٔ تعیین شیب منحنی

$$R = \frac{k_i}{K_{total}} \times 100 \qquad (1)$$

در اینجا $K_{total} = \sum \frac{3EI}{L^3}$ ، L طول هر عضو و EI صلبیت خمشی مقطع هر عضو اتصالی می‌باشد.

مدل اول فاقد هرگونه ور ق پیوستگی و ورق پیرامونی است و دارای گیرداری به‌میزان ۸۵/۳۷ درصد می‌باشد. با اضافه‌کردن ورق‌های پیوستگی در تراز بال‌های فوقانی و تحتانی تیر در داخل ستون، گیرداری به میزان ۹/٤۹ درصد رشد داشته است و به ۹۳/٤۸ درصد رسیده است و سبب صلب‌شدن اتصال گردیده است. برای بررسی و مقایسهٔ مدل اول و سوم ورق‌های پیوستگی از داخل ستون حذف شده‌اند و با سخت‌کننده‌های خارجی جایگزین شده‌اند. مشاهده می‌شود که درصد گیرداری به‌میزان ۱۲/۱٦ افزایش یافته و از ۸۵/۳۷ به ۹۵/۷۵ رسیده است که تأمین‌کنندهٔ گیرداری اتصال طبق AISC می‌باشد. اتصال پیشنهادی که شامل سخت‌کننده‌های خارجی است و به‌وسیلهٔ بتن پر-کننده و شبکه‌های آرماتور افقی داخل ستون تقویت می‌شود، دارای درصد گیرداری حدود ٪۹٦/۱۸ می‌باشد که در بین تمامی مدل‌ها بیشترین درصد گیرداری را داراست و اتصال کاملا صلب محسوب می‌شود. مقایسهٔ این مدل با مدل اول نشان می‌دهد که حضور سخت-کننده‌های خارجی، بتن و شبکه‌های آرماتور افقی درصد گیرداری را به‌میزان ٪۱۲/٦٦ افزایش داده است.

باتوجه به این‌که هدف انجام این تحقیق حذف ورق‌های پیوستگی داخلی و جایگزینی آن با سخت-کننده‌های خارجی بوده است، در این بخش به مقایسهٔ این دو اتصال پرداخته شده است. نتایج بیانگر این مطلب است که اتصال با ورق پیوستگی داخلی دارای شاخص گیرداری ۹۳/٤۸ درصد و اتصال با سخت‌کنندهٔ خارجی دارای شاخص گیرداری ۹۵/۷۵ درصد است که شاخص گیرداری اتصال با سخت‌کنندهٔ خارجی به‌میزان ۲/٤۳ درصد بیشتر از اتصال با ورق پیوستگی داخلی است. این امر مبین این است که اتصال با سخت‌کنندهٔ خارجی از لحاظ گیرداری جایگزین مناسبی برای ورق پیوستگی داخلی می‌باشد.

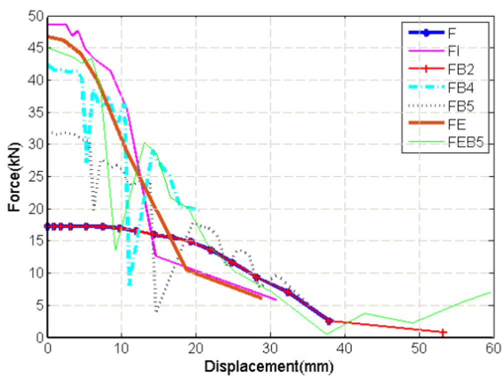
حضور ورق‌های پیوستگی در تراز بال‌های فوقانی و تحتانی تیرها در داخل ستون که مطلوب آئین‌نامهٔ ۲۸۰۰ و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران می‌باشد با مشکلاتی در زمینهٔ اجرا همراه است. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود که تیر با سخت‌کننده‌های خارجی به‌همراه شبکه-های آرماتور افقی و بتن پرکنندهٔ داخل آن به ستون متصل شود تا جایگزین مناسبی برای اتصال با ورق‌های پیوستگی باشد. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که درصد گیرداری از ۹۳/٤۸ به ۹٦/۱۸ درصد می‌رسد که باعث افزایش سختی اتصال به‌میزان ۲ درصد شده است. این نتیجه بیانگر آن است که این اتصال از نظر شاخص گیرداری جایگزین مناسبی برای اتصال با ورق‌های پیوستگی داخلی است و مشکلات مربوط به اجرای دشوار و نامطمئن ورق‌های پیوستگی به‌علت عدم جوشکاری ضلع چهارم ورق‌ها به ستون را ندارد. برای مقایسهٔ تأثیر سخت‌کنندهٔ خارجی با شبکه‌های آرماتور افقی، میزان گیرداری اتصال این دو مدل مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج مبین این مطلب است که شاخص گیرداری مدل سوم ۹۵/۷۵ درصد و مدل چهارم ۹۲/۰۱ درصد است و نشان می‌دهد که شاخص گیرداری اتصال با سخت‌کنندهٔ خارجی حدود ٤/۰٦ درصد بیشتر از اتصال با شبکهٔ آرماتور افقی می‌باشد.

جدول٤ شاخص گیرداری اتصالات مورد مطالعه

نام مدل	گیرداری (R %)	$\frac{R_i}{R^*} \times 100$
F	۸۵/۳۷	۹۱/۳۲
FI(*)	۹۳/٤۸	۱۰۰
FE	۹۵/۷۵	۱۰۲/٤۲
FB2	۹۲/۰۱	۹۸/٤۳
FB4	۹۳/۳٤	۹۹/۸۵
FB5	۹٤/۲۸	۱۰۰/۸٦
FEB5	۹٦/۱۸	۱۰۲/۸۹

از جدول (٤) ملاحظه می‌شود که مدل اول با درصد گیرداری ۸۵/۳۷ در زمره اتصالات صلب طبقه-بندی نمی‌شود و سایر اتصالات با درصد گیرداری بالای ۹۰ درصد در محدودۀ اتصالات صلب طبقه‌بندی می-شوند. مقایسۀ اتصالات صلب نشان می‌دهد که مدل پنجم با درصد گیرداری ٪۹٦/۱۸ نسبت به سایر اتصالات از نقطه‌نظر گیرداری عملکرد مناسب‌تری دارد و همچنین داده‌های جدول (٤) نشان می‌دهند که مدل‌های دارای سخت‌کننده‌های خارجی درصد گیرداری بیشتری درمقایسه با مدل‌های با ورق پیوستگی دارند. علاوه‌براین مشکلات اجرایی مربوط به اجرای دشوار و نامطمئن ورق‌های پیوستگی را مرتفع نموده‌اند.

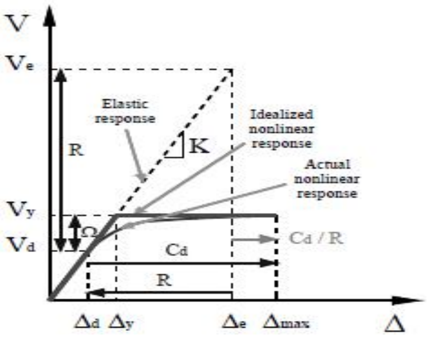
در شکل (۱۰) میزان کاهش سختی به‌ازای افزایش تغییرمکان برای مدل‌های موردنظر ارائه شده است. باتوجه به شکل میزان سختی اولیۀ مدل‌های F و FB2 نسبت به سایر مدل‌ها کمتر می‌باشد و نرخ کاهش آن نیز کمتر می‌باشد. از طرفی مدل‌های FI و FE و FEB5 سختی اولیۀ بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها کسب کرده‌اند و نرخ کاهش سختی در این مدل‌ها نیز بیشتر از سایرین می‌باشد.



شکل ۱۰ منحنی سختی-تغییرمکان مدل‌ها

مقایسۀ اتصالات از دیدگاه شکل‌پذیری. به‌طور معمول در قاب‌های خمشی چنین انتظار می‌رود که بروز پلاستیسیته در نواحی دور از بر ستون و به شکل تشکیل مفصل پلاستیک در تیر، مقدم بر ستون اتفاق افتد. با بررسی منحنی‌های بار- تغییرمکان تیر در مدل‌های مورد مطالعه، ملاحظه می‌شود در مدل‌هایی که نتایج تحلیل آنها حاکی از آن بوده است که در آنها مفصل پلاستیک به‌طور کامل در تیر تشکیل می‌شود، نسبت شکل‌پذیری افزون-تری درمقایسه با سایر اتصالات حاصل شده است. جدول (۵) مقادیر شکل‌پذیری را برای انواع مدل‌های مورد مطالعه ارائه می‌دهد.

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \qquad (۲)$$



شکل ۱۱ نحوۀ تعیین ضریب شکل‌پذیری [١٤]

جدول۵ ضریب شکل‌پذیری اتصالات مورد مطالعه

نام مدل	شکل‌پذیری (μ)	$\frac{\mu_i}{\mu^*}\times100$
F	۳/۶۶	۵۹/۹۰
FI(*)	۶/۱۱	۱۰۰
FE	۴/۴۶	۷۲/۹۹
FB2	۳/۸۲	۶۲/۵۲
FB4	۴/۰۱	۶۵/۶۳
FB5	۴/۲	۶۸/۷۴
FEB5	۷/۰۴	۱۱۵/۲۲

باتوجه به جدول (۵) در بررسی مقایسۀ اتصالات مورد مطالعه، مدل دارای ورق ذوزنقه‌ای پیرامونی شامل بتن و شبکه‌های آرماتور افقی در داخل ستون، بزرگ‌ترین نسبت شکل‌پذیری را از بین مدل‌های مورد مطالعه دارد

و مدل دوم بعد از مدل هفتم بزرگ‌ترین نسبت شکل-پذیری را داراست. این امر مبین این مطلب است که وجود ورق‌های پیوستگی در افزایش شکل‌پذیری نقش مؤثری دارد.

مقایسهٔ اتصالات از دیدگاه مقاومت نهایی. در جدول (٦) مقادیر بار حداکثر حاصل از تحلیل برای هر یک از اتصالات مورد مطالعه همراه با نسبت مقادیر بار فوق به مقدار بار حداکثر به‌دست‌آمده از تحلیل مدل اتصال با ورق پیوستگی داخلی (اتصال مرجع) ارائه شده است.

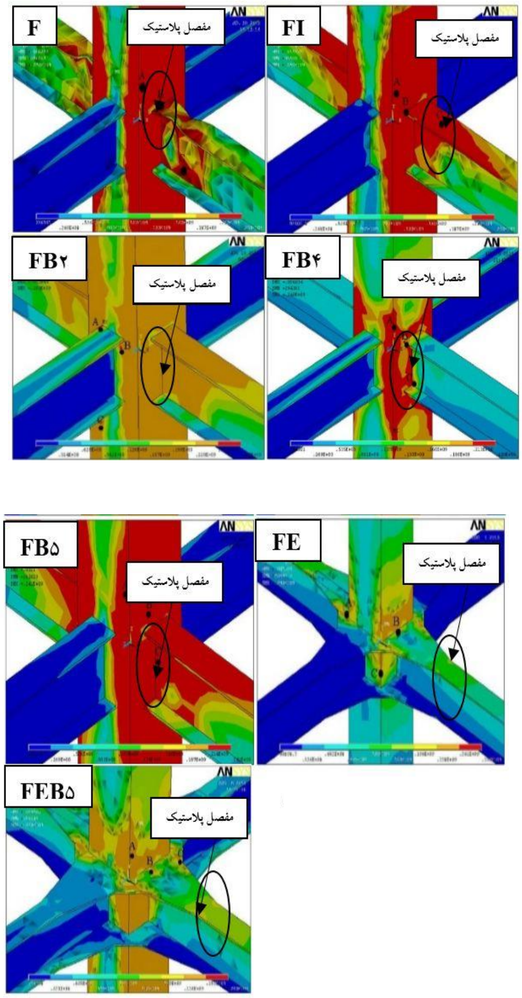
جدول٦ مقاومت نهایی اتصالات مورد مطالعه

نام مدل	بار حداکثر(kN)	$\frac{P_{\max i}}{P_{\max}^{*}}$
F	۵۵/۷۷	۶۶/۱۱
FI(*)	۸۴/۳۶	۱۰۰
FE	۸۵/۰۹	۱۰۰/۸۶
FB2	۵۷/۷۲	۶۸/۴۲
FB4	۶۲/۱۸	۷۳/۷۱
FB5	۶۲/۷۶	۷۴/۳۹
FEB5	۸۹/۴۵	۱۰۶

از میان مدل‌های مطالعه‌شده، مدل هفتم بیشترین بار قابل تحمل را داراست و از طرفی، مدلی که بدون ورق پیوستگی و سخت‌کنندهٔ خارجی بوده است (مدل اول)، کمترین بار قابل تحمل را نشان داده است. آن طور که از نتایج خلاصه‌شده در جدول (۵) برای مدل‌های تحت بررسی استنتاج می‌شود، بار حداکثر اتصال دارای سخت‌کنندهٔ پیرامونی (مدل سوم)، به‌میزان ٪۸٦/. از اتصال با ورق پیوستگی داخل ستون افزون‌تر بوده است. البته لازم به ذکر است که میزان مصالح مصرفی در اتصال دارای ورق ذوزنقه‌ای پیرامونی اندکی بیش از مدل دارای ورق پیوستگی داخل ستون می‌باشد. نتیجهٔ دیگری که از جدول (٦) استنتاج می‌شود این است که میزان بار حداکثر در مدل پیشنهادی ۷ درصد بیشتر از مدل دارای ورق پیوستگی داخل ستون می‌باشد. همچنین از مقایسهٔ ظرفیت نهایی مدل‌های سوم و هفتم نتیجه می‌شود که حضور بتن به‌همراه شبکه‌های آرماتور افقی باعث افزایش ۵/۱ درصدی ظرفیت اتصال می‌شود. با مقایسهٔ اتصالات چهارم، پنجم و ششم می‌توان به تأثیر شبکهٔ آرماتور افقی در افزایش ظرفیت نهایی اتصال اشاره کرد. با افزایش تعداد شبکه‌ها از دو به پنج، ظرفیت نهایی اتصال حدود ۸/۷ درصد و از چهار به پنج شبکه حدود ۱ درصد افزایش می‌یابد. از مقایسهٔ ظرفیت نهایی مدل اول و دوم مشخص می‌شود که ظرفیت نهایی مدل دوم تقریبا ۵۱/۳ درصد بیشتر از مدل اول می‌باشد.

مقایسهٔ اتصالات از دیدگاه محل تشکیل مفصل پلاستیک. به‌طور کلی مکان‌های تشکیل مفصل پلاستیک تیر در اتصالات مختلف با هم متفاوت می‌باشد، ولی نتایج بیانگر این مطلب است که در اتصالاتی که پهنای بال تیر آنها در حضور ورق‌های ذوزنقه‌ای پیرامونی در نزدیکی اتصال افزایش یافته باشد مفصل پلاستیک از بر ستون فاصله می‌گیرد و به‌طور کامل در تیر تشکیل می‌گردد. با جا دادن بتن داخل ستون قوطی‌شکل، کرنش پلاستیک در ستون کاهش می‌یابد و روند گسترش پلاستیسیته از ستون به داخل بال تیر انجام می‌گردد. همچنین مقایسه‌ها نشان می‌دهد در مدل‌های دارای ورق پیرامونی، ابتدا ورق پیرامونی در بر اتصال پلاستیک شده و با افزایش بار پلاستیسیته در ورق پیشروی می‌کند و درانتهای ورق به تیر گسترش می‌یابد و مفصل پلاستیک به‌طور کامل در تیر تشکیل می‌شود. چنان‌چه انتظار می‌رفت، موقعیت مفصل پلاستیک به اندازهٔ طول ورق ذوزنقه‌ای از بر ستون فاصله گرفته است. تنش حداکثر در داخل تیر و با فاصلهٔ مناسب از بر اتصال در محل تشکیل مفصل پلاستیک اتفاق می‌افتد. این موضوع نشان‌دهندهٔ اثر مطلوب تقویت اتصال مورد مطالعه از راه دیافراگم پیرامونی است، که

باتوجه به فرم ذوزنقه‌ای‌شکل سبب شده است که تشکیل مفصل پلاستیک در موقعیت مناسب و در فاصله‌ای برابر با طول ورق ذوزنقه‌ای‌شکل از بر اتصال انجام گیرد. با جا دادن بتن داخل ستون قوطی‌شکل دارای سخت کنندهٔ خارجی، کرنش پلاستیک درمقایسه با مدل ستون قوطی‌شکل بدون بتن پرکننده تغییر چندانی نشان نداده است.



شکل ۱۲ توزیع تنش اتصالات

نکتهٔ مهمی که از استفادهٔ بتن در داخل ستون استنتاج می‌شود، کاهش قابل ملاحظهٔ مقادیر تنش و تغییرشکل ورق در ستون است. در مدل شامل ورق پیوستگی داخلی به‌همراه بتن داخل ستون کرنش پلاستیک در داخل تیر از کنج ستون شروع شده و در همان مکان گسترش پیدا کرده و به دنبال آن به جان تیر نفوذ کرده است.

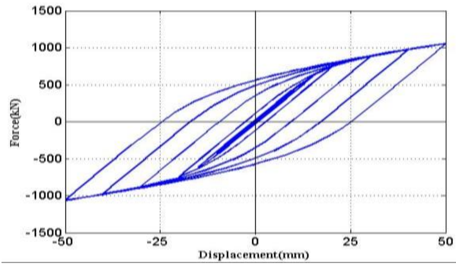
مقایسهٔ تنش حداکثر اتصالات. میزان حداکثر تنش ایجادشده در هر اتصال در قالب جدول (۷) ارائه شده است. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع نسبت تنش حداکثر هر حالت نسبت به حالت مرجع نیز ارائه گردیده است.

جدول ۷ مقادیر حداکثر تنش اتصالات

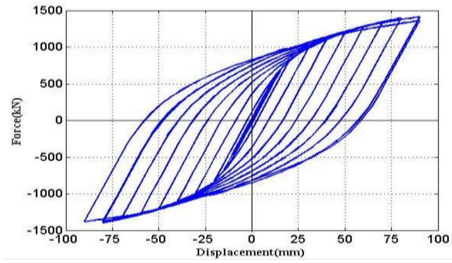
نام مدل	محل حداکثر تنش	حداکثر تنش (Mpa)	$\frac{\sigma_i}{\sigma^*}\times 100$
F	B	۲۸۵	۱۰۲/۱۵
FI(*)	C	۲۷۹	۱۰۰
FE	B	۳۳۰	۱۱۸/۲۸
FB2	C	۳۰۵	۱۰۹/۳۱
FB4	A	۲۹۴	۱۰۵/۳۸
FB5	A	۲۶۰	۹۳/۱۹
FEB5	A	۳۶۴	۱۳۰/۴۶

حضور المان خارجی سبب افزایش سختی در اطرف چشمهٔ اتصال می‌شود. از آنجایی که نیرو به نسبت سختی توزیع می‌شود، تنش در این اتصالات افزیش می‌یابد. بنابراین، مدل‌های FE با حدود ۱۸ درصد و مدل FEB5 با ۳۰/٤٦ درصد افزایش تأثیر المان‌های خارج را به‌خوبی نشان می‌دهند.

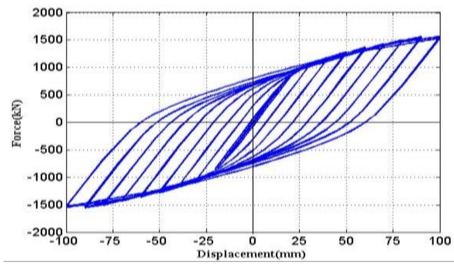
بررسی نتایج تحلیل و مدل‌سازی تحت تأثیر بارگذاری رفت‌وبرگشتی. مجموعه منحنی‌های حاصل از بارگذاری چرخه‌ای مدل‌های اجزای محدود اتصالات مورد مطالعه به‌صورت چرخه‌های هیسترتیک بار-تغییرمکان تیر در اشکال (۱۳ تا ۱۹) ارائه شده است.



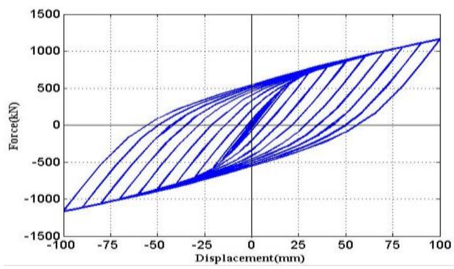
شکل۱۳ منحنی هیسترزیس مدل F



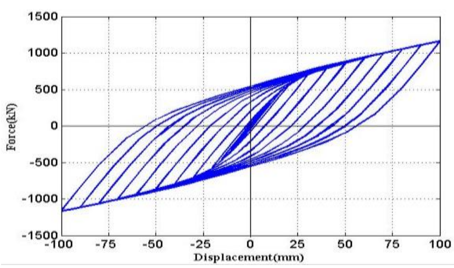
شکل١٤ منحنی هیسترزیس مدل FI



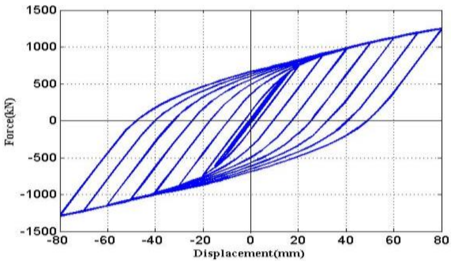
شکل١٥ منحنی هیسترزیس مدل FE



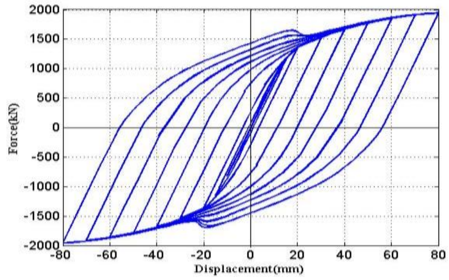
شکل١٦ منحنی هیسترزیس مدلFB2



شکل١٧ منحنی هیسترزیس مدل FB4



شکل١٨منحنی هیسترزیس مدل FB5



شکل١٩ منحنی هیسترزیس مدل FEB5

منحنی هیسترزیس مدل‌ها نشان می‌دهد که اتصال پیشنهادی دارای بیشترین جذب انرژی است و پس از آن مدل سوم از جذب انرژی بالایی برخوردار است که علت این امر وجود سخت‌کننده‌های خارجی بوده است.

مقایسهٔ میزان جذب انرژی اتصالات. یکی از پارامترهایی که کفایت اتصال را بیان می‌کند، میزان انرژی جذب‌شده توسط اتصال می‌باشد. هرچه این مقدار بیشتر باشد رفتار اتصال مناسب‌تر است. میزان انرژی جذب‌شده توسط اتصالات براساس چرخه هیسترزیس مدل‌ها در قالب جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۸ مقادیر انرژی مطلق و نسبی اتصالات

نام مدل	انرژی اتصال E_i(kJ)	$\frac{E_i}{E^*}\times 100$
F	۱۳۹۰۵/۶۷	۷۲/۳۵
FI(*)	۱۹۲۲۰	۱۰۰
FE	۱۹۸۰۰	۱۰۳/۰۱۷
FB2	۱۴۳۳۸/۲	۷۴/۶
FB4	۱۵۸۷۵/۷۲	۸۲/۶
FB5	۱۶۴۱۰/۰۲	۸۵/۳۴
FEB5	۲۷۶۱۹/۱۴	۱۴۳/۷۵

باتوجه به این‌که اتصال شامل ورق‌های پیوستگی، با توصیه‌های آئین‌نامهٔ ۲۸۰۰ تطابق دارد، به‌عنوان معیار مقایسه درنظر گرفته شده است و مقدار انرژی جذب‌شده در چرخهٔ مورد بحث، درمقایسه با مقادیر متناظر محاسبه‌شده، برای مدل با ورق پیوستگی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی مدل هفتم به‌علت حضور سخت‌کنندهٔ خارجی بیشتر از سایر مدل‌ها بوده است.

نتیجه‌گیری

نتایج قابل ملاحظه‌ای که از این بررسی‌ها به‌دست آمده است، به شرح زیر می‌باشد:

۱- باتوجه به اجرای دشوار ورق‌های پیوستگی و جایگزینی آن با سخت‌کننده‌های خارجی مشاهده می‌شود که سخت‌کننده‌های خارجی سبب افزایش درصد گیرداری و مقاومت نهایی اتصال می‌شوند و مفصل پلاستیک را به منطقهٔ امن و کنترل‌شده‌ای هدایت می‌کنند، ولی به میزان اندکی شکل‌پذیری اتصال را کاهش می‌دهند؛ از این‌رو، این سخت‌کننده‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای ورق‌های پیوستگی داخل ستون باشند.

۲- جانمایی ورق‌های پیوستگی داخل ستون سبب افزایش گیرداری، شکل‌پذیری و ظرفیت نهایی اتصال شده است.

۳- از مقایسهٔ مدل‌های با سخت‌کننده‌های خارجی نتیجه می‌شود که شبکه‌های آرماتور در اتصال سبب افزایش درصد گیرداری اتصال از ۹۵/۷۵ به ۹۶/۱۸ درصد می‌شوند و شکل‌پذیری اتصال را به‌میزان ۵۷/۷٤ درصد افزایش می‌دهند و سبب بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در ظرفیت اتصال می‌شوند.

٤- در حیطهٔ بررسی‌ها، مدل پیشنهادی (FEB5) با سختی ۹٦/۱۸ درصد و مدل (FE) با سختی ۹۵/۷۵ درصد بیشترین درصد گیرداری را به خود اختصاص داده‌اند و جایگزین مناسبی برای اتصال با ورق‌های پیوستگی داخلی می‌باشند.

۵- در بین مدل‌های مطالعه‌شده مدل (FEB5)، شکل‌پذیری معادل ۷/۰٤ را داراست و بعد از آن اتصال با ورق‌های پیوستگی داخلی بیشترین شکل‌پذیری را به خود اختصاص داده است که نشان‌دهندهٔ تأثیر المان‌های داخلی یعنی شبکه‌های آرماتور و ورق‌های پیوستگی در میزان شکل‌پذیری می‌باشد.

٦- مقاومت نهایی اتصال پیشنهادی بالاترین مقدار را در بین مدل‌ها به‌خود اختصاص داده است که علت این امر حضور هم‌زمان سخت‌کننده‌های خارجی، شبکه‌های آرماتور افقی و بتن پرکننده داخل ستون می‌باشد.

۷- وجود سخت‌کننده‌های خارجی در اطراف اتصال، محل تشکیل مفصل پلاستیک را از بر ستون به فاصلهٔ طول ورق‌های پیرامونی دور می‌کند و به منطقهٔ امن و کنترل‌شده‌ای در داخل تیر هدایت می‌کند.

۸- افزایش تعداد شبکه‌های آرماتور افقی در چشمهٔ اتصال سبب افزایش ۲/۷۵ درصدی میزان گیرداری شده و شکل‌پذیری را به‌میزان ۳/۷۵ درصد بالا برده و همچنین مقامت نهایی چشمهٔ اتصال را ٦/٦۷ درصد بهبود بخشیده است.

۹- از روی منحنی هیسترزیس مدل‌ها نتیجه شده که میزان استهلاک انرژی مدل پیشنهادی به‌علت عریض‌تر بودن منحنی نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر بوده است.

۱۰- ازنظر توزیع تنش، ورق‌های پیوستگی بهترین عملکرد را داشته‌اند. لازم به ذکر است که توزیع تنش در نزدیکی چشمهٔ اتصال غیریکنواخت می‌شود و با دور شدن از آن یکنواخت می‌گردد.

۱۱- باتوجه به این‌که درصد گیرداری مدل اول کمتر از ۹۰ درصد است، جزو اتصالات نیمه‌صلب محسوب می‌شود و سایر مدل‌ها با داشتن درصد گیرداری بالای ۹۰ درصد جزو اتصالات صلب طبقه‌بندی می‌شوند.

مراجع

1. Lee, S.L., Ting, L. C. and Shanmugam, N. E., "Box Column to I-beam Connections with External Stiffeners", *Journal of Construct. Steel Research*, Vol.18, pp. 209-226, (1991).

2. Lee, S.L., Ting, L. C. and Shanmugam, N. E., "Use of External T-stiffeners in Box-column to I-beam Connections", *Journal of Construct. Steel Research*, Vol. 26, pp. 77-98, (1993).

3. Lee, S.L. Ting, L. C. and Shanmugam, N. E., "Nonlinear Analysis of I-beam to Box Column Connections", *Journal of Construct. Steel Research*, Vol. 28, pp. 257-278, (1994).

4. Lee, S.L. Ting, L. C. and Shanmugam, N. E., "Behavior of I-beam to Box-column Connection Stiffened Externally and Subjected to Fluctuating Loads", *Journal of Construct. Steel Research*, Vol. 20, pp.129-148, (1991).

5. Lee, S.L. Ting, L. C. and Shanmugam, N. E, "Static Behavior of I-beam to Box-column Connections with External Stiffeners", *The Structural Engineer*, Vol. 71(15), pp.269-275, (1993).

6. Shanmugam, N. E, Fellow, ASCE and. Ting, L. C, "Welded Interior Box-column to I-beam Connections", *Journal of structural engineering*, pp. 824-830, (1995).

7. Lee, S.L. Ting, L. C. and Shanmugam, N. E., "Design of I-beam to Box-column Connections Stiffened Externally" , *Engineering Journal*, pp. 141-149, (1993).

۸. مالک شاهرخ، حاجی فتحعلی، «مطالعهٔ رفتار تیر به ستون قوطی شکل»، نشریهٔ مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشکدهٔ فنی، (۱۳۸۹).

۹. زاهدی مرتضی، سفیدگران مجید، «استفاده از سخت‌کننده‌های بیرونی به‌عنوان جایگزینی برای ورق‌های پیوستگی داخلی در اتصالات صلب تیر I به ستون قوطی‌شکل»، هفتمین کنگرهٔ بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (۱۳۸۵).

10. Goswami, R. and Murty, C.V.R., "Externally Reinforced Welded I-beam-to Box-column Seismic Connection", *Journal of engineering mechanics ASCE*, Vol. 136(1), pp. 23-30, (2010).

11. Satish Kumar, S.R. and Prasada Roa, D.V. "RHS Beam-to-column Connection with Web Opening-Experimental Study and Finite Element Modeling", *Journal of constructional steel research*, Vol. 62, pp. 739-746, (2006).

12. Prasada Roa, D.V. and Satish Kumar, S.R. "RHS Beam-to-column Connection with Web Opening Parametric Study and Design Guidelines", *Journal of constructional steel research*, Vol. 62, pp. 747-756, (2006).

13. Clark, P., Protocol for Fabrication, "Inspection, Testing, and Documentation of Beam-column Connection Test and other Experimental Specimen", *SAC Joint Venture, Sacramento*, California, (1997)

14. Uang, C. M., "Establishing R (or R_w) and C_d Factors for Building Seismic Provisions.", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.117, No 10, pp.19-28 , (1991).